

Анализ зависимости магнитных свойств гранулированных ферромагнитных образцов от соотношения их длины к диаметру

**А. В. Сандуляк¹, Р. Ю. Ткаченко¹, Д. А. Сандуляк¹, М. Н. Полисмакова¹,
А. А. Сандуляк¹, В. А. Ершова²**

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация,
e-mail: a.sandulyak@mail.ru, separator-mami@mail.ru, d.sandulyak@mail.ru, m.polismakova@mail.ru

²Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация,
e-mail: a.separator@mail.ru, v.ershova@mail.ru

Рассмотрены проблемы экспериментальных определений магнитных параметров неоднородных гранулированных магнетиков. Отмечено, что нехватка прямых и (или) косвенных экспериментальных данных о магнитных свойствах гранулированных ферромагнитных образцов различной относительной длины, в частности, негативно сказывается на обоснованности требований и решений по созданию и обеспечению работоспособности функциональных элементов и рабочих органов различных аппаратов и приборов. Для цилиндрических полишаровых образцов, относительная длина которых находится в диапазоне 1–16, в рамках макромодели эффективной среды получены зависимости индукции, магнитной проницаемости, восприимчивости и намагниченности от напряжённости намагничивающего поля. Показано, что в диапазоне напряжённости поля 9–47 кА/м значения индукции и намагниченности исследуемых образцов увеличиваются, что свидетельствует об отсутствии магнитного насыщения гранулированных магнетиков (в отличие от сплошных магнетиков). При этом значения магнитной проницаемости и восприимчивости остаются практически стабильными. Полученные результаты будут полезны при создании рабочих органов различных аппаратов и приборов.

Ключевые слова: полишаровый образец цилиндрической формы, относительная длина, полевые зависимости, магнитная индукция, проницаемость, восприимчивость, намагниченность.

Введение. В различных аппаратах и приборах лабораторного и промышленного назначения роль функциональных элементов, рабочих органов выполняют неоднородные ферро- и ферримагнетики в виде упаковки (засыпки) ферромагнитных гранул (зёрен и порошков) [1–11]. Информация о таких гранулированных магнетиках должна содержать данные об их магнитных свойствах. При этом гранулированные магнетики рассматривают, прежде всего, как формально квазисплошные объекты, т. е. используют модель так называемой эффективной среды. Данная модель предусматривает получение значений соответствующих эффективных параметров магнетиков – магнитной индукции B , проницаемости μ , восприимчивости χ , намагниченности M и др. Такую макромодель эффективной среды применяют не только для описания свойств гетерогенных магнетиков [8, 12], но и для определения эффективной диэлектрической проницаемости материалов [13].

Неоднородные магнетики (в рассматриваемом случае – гранулированные, формально уподобляемые квазисплошным) обычно являются короткими, т. е. имеют сравнительно сопоставимые (преимущественно в пределах одного порядка) размеры в трёх характерных направлениях (одно из них – направление намагничивания). Разные по размерам, но при этом одинаковые по составу квазисплошные,

как и сплошные (в определённой мере однородные), образцы-тела обладают разными магнитными свойствами из-за проявления размагничивающего фактора, в существенной мере зависящего от формы образца-тела. В настоящее время практически отсутствуют необходимые прямые и (или) косвенные экспериментальные данные о магнитных параметрах коротких гранулированных образцов. Так, отсутствуют семейства полученных при целенаправленном изменении геометрии образца полевых зависимостей магнитных параметров. Поэтому невозможно обосновать выбор и проанализировать работоспособность ферро- и ферримагнитных гранулированных функциональных элементов, рабочих органов аппаратов и приборов, например, магнитных фильтр-сепараторов и анализаторов (фильтрационного типа) [6, 7]. В работе [6] рассмотрена следующая ситуация: в связи с отсутствием данных о магнитных параметрах разработчики соленоидных фильтр-сепараторов ограничились испытаниями лабораторного тест-фильтра (малой производительности с соответствующей длиной фильтр-матрицы цилиндрической формы) и рекомендовали лабораторно установленную длину фильтр-матрицы для производства промышленных аппаратов повышенной и высокой производительности (с увеличенным сечением фильтр-матрицы), что привело к получению крайне низкого

результата их работы. Отсутствие указанных экспериментальных данных магнетиков также не позволяет объективно анализировать различные, зачастую разноречивые, результаты компьютерного моделирования для совершенствования подходов к моделированию.

Базой необходимых знаний о магнитных свойствах (магнитной проницаемости μ , восприимчивости χ , намагниченности M) как сплошных, так и квазисплошных образцов могут служить сведения, получаемые, например, баллистическим методом [14, 15], о средней индукции B поля в образце в зависимости от его геометрии и напряжённости H приложенного магнитного поля. Обобщающим безразмерным геометрическим параметром для квазисплошного и сплошного образцов цилиндрической формы является относительная длина L/D образца длиной L и диаметром D [14–20].

В работе [21] изложены результаты анализа полевых зависимостей магнитных параметров B , μ , χ , M , полученные для гранулированных (полишаровых) образцов цилиндрической формы с различной относительной длиной $L/D=1...22$ в диапазоне напряжённости поля $H=25...163$ кА/м. Образцы для исследований представляли собой плотные засыпки подшипниковых шаров из стали марки ШХ15 диаметром 6 мм в цилиндрической ёмкости диаметром 49 мм. Петля для измерений магнитного потока (и последующего получения полевых зависимостей индукции) размещалась посередине образца. Были оценены магнитные свойства образцов такого рода с учётом особенностей, отличающих эти образцы от сплошных образцов из стали. Однако остались нерешёнными некоторые вопросы, например, отсутствие признаков магнитного насыщения гранулированных образцов при их намагничивании, в отличие от известных результатов намагничивания сплошных, в частности, стальных образцов. Это прослеживалось уже на получаемых изначально полевых зависимостях индукции B , а затем особенно наглядно – на полевых зависимостях намагниченности M гранулированных образцов. В указанных зависимостях, в том числе полученных для длинного образца (т. е. для квазисплошного материала этого образца) отсутствует область автомодельных значений M при увеличении напряжённости поля H до 163 кА/м и даже более.

Цель работы – получить зависимости индукции, магнитной проницаемости, восприимчивости и намагниченности цилиндрических полишаровых образцов в широком диапазоне их относительной длины от напряжённости намагничивающего поля.

Результаты исследований и их анализ. На рис. 1 показано дополнительно полученное – расширенное по сравнению с приведённым в работе [21] – семейство полевых зависимостей индукции B цилиндрических гранулированных образцов. Исследовали засыпку шаров из нержавеющей стали диаметром 8 мм в цилиндрической ёмкости диаметром $D=40$ мм различной длины L . Эксперименты проводили при напряжённости поля $H=9,4...47,2$ кА/м и относительной длине образцов $L/D=1...16$. Значения B находили как частное от деления измеряемых милливеберметром значений магнитного потока (с погрешностью не более 1,7 %) сквозь петлю,

охватывающую образец в его средней части, на площадь петли и число её витков. При этом число сравнительно коротких образцов (характеризующихся допредельными кривыми намагничивания, т. е. уступающими кривой намагничивания достаточно длинного образца) образцов и соответствующих им зависимостей увеличено почти в три раза по сравнению с работой [21].

Значения индукции B монотонно возрастают с увеличением напряжённости поля H (см. рис. 1) аналогично кривым $B(H)$

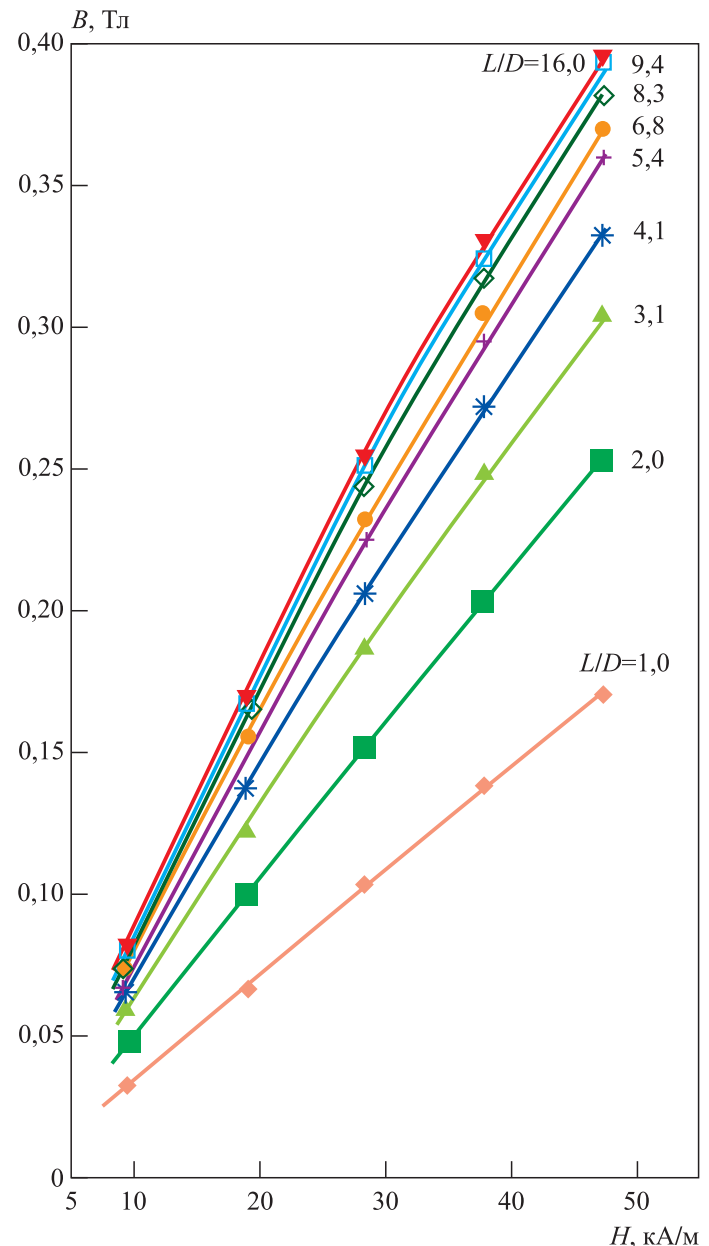


Рис. 1. Зависимости магнитной индукции цилиндрических полишаровых образцов от напряжённости поля при различной относительной длине образца L/D

Fig. 1. Field dependencies of magnetic induction at various relative length of a cylindrical specimens of balls L/D

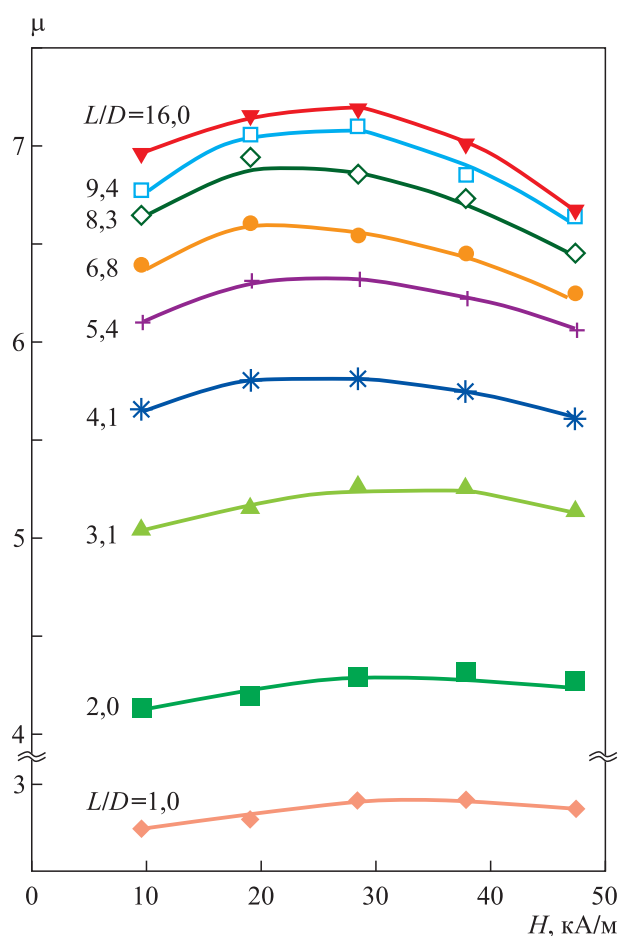


Рис. 2. Магнитная проницаемость цилиндрических полишаровых образцов, рассчитанная по формуле (1) с учётом приведённых на рис. 1 данных о магнитной индукции

Fig. 2. Magnetic permeability of a cylindrical specimens of balls taking into account formula (1) and data on Fig. 1

из [21]. Судя по взаимному расположению кривых, с повышением относительной длины образцов L/D значения B в образце увеличиваются (при снижении интенсивности этого увеличения) вплоть до достижения при $L/D \geq [L/D] \approx 10 \dots 12$ предельных значений индукции $B = B_m$ и соответственно предельной кривой намагничивания. Эту предельную кривую следует воспринимать уже как кривую намагничивания именно материала (квасисплошного) образца.

На рис. 2 представлены полевые зависимости магнитной проницаемости μ гранулированных (полишаровых) образцов. Значения μ найдены с учётом значений индукции B на рис. 1 по формуле

$$\mu = B/(\mu_0 H), \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная константа.

Как и в случае с семейством полевых зависимостей индукции B , семейство полевых зависимостей магнитной

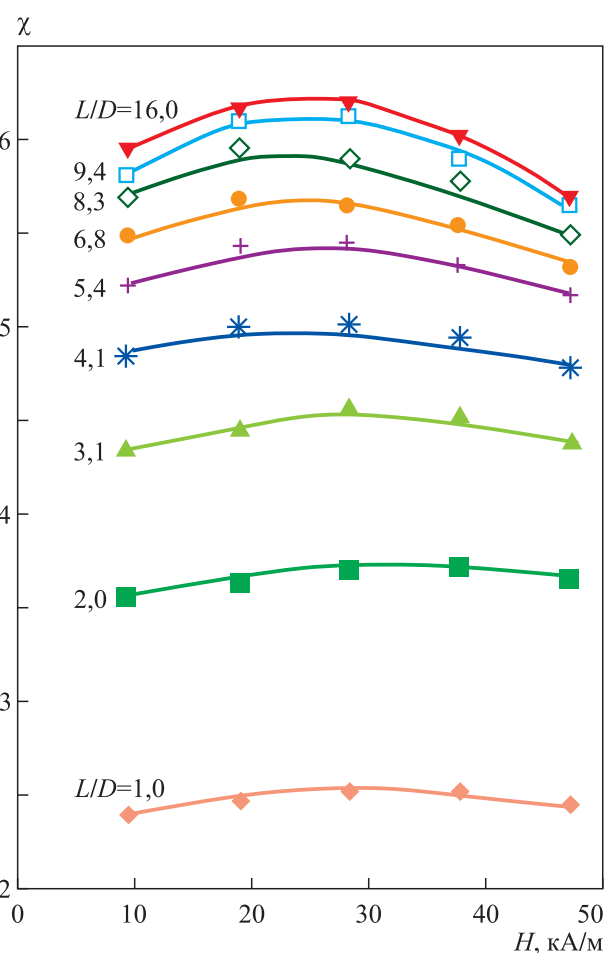


Рис. 3. Магнитная восприимчивость цилиндрических полишаровых образцов, рассчитанная по формулам (2), (3) для длинного и коротких образцов соответственно с учётом приведённых на рис. 2 данных о магнитной проницаемости

Fig. 3. Magnetic susceptibility of a cylindrical specimens of balls taking into account formula (2) for short and (3) for long specimens and data on Fig. 2

проницаемости μ ограничивается сверху предельной кривой $\mu = \mu_m$, характеризующей магнитную проницаемость именно материала (квасисплошного) образца. Согласно рис. 2 экспериментальные зависимости $\mu(H)$ отличаются от аналогичных зависимостей, приведённых в работе [21]: в принятом диапазоне напряжённости поля $H = 9,4 \dots 47,2$ кА/м кривые лежат в окрестности слабо выраженных экстремумов μ , т. е. в области почти стабильных значений μ .

На рис. 3 представлены полевые зависимости магнитной восприимчивости χ гранулированных (полишаровых) образцов. При этом следует различать получение зависимостей магнитной восприимчивости именно материала образца $\chi = \chi_m$ (здесь – длинного образца с $L/D \geq [L/D] \approx 10 \dots 12$) и того или иного короткого образца $\chi < \chi_m$. В первом и втором случаях соответственно используют формулы

$$\chi_m = \mu_m - 1; \quad (2)$$

$$\chi = \mu(\mu_m - 1) / \mu_m. \quad (3)$$

Как отмечено в [21], данное обстоятельство не всегда учитывается при анализе и обработке экспериментальных данных (например, в [14]), что обуславливает появление погрешности полученных результатов.

Согласно рис. 3 экспериментальные зависимости $\chi(H)$ отличаются от аналогичных зависимостей, приведённых в работе [21] (как и зависимости $\mu(H)$): в принятом диапазоне напряжённости поля $H = 9,4 \dots 47,2$ кА/м кривые лежат в окрестности слабо выраженных экстремумов χ , т. е. в области почти стабильных значений χ .

На рис. 4 приведены полевые зависимости намагниченности M изучаемых гранулированных образцов. Необходимые для построения зависимостей значения M находят по значениям магнитной восприимчивости χ (см. рис. 3):

$$M = \chi H. \quad (4)$$

Характер полученных полевых зависимостей намагниченности M на рис. 4 (как и индукции B , см. рис. 1) подтверждает сделанный в [21] вывод об отсутствии признаков магнитного насыщения гранулированных магнетиков. Так, с увеличением напряжённости поля H эти зависимости, хотя и с уменьшением интенсивности, но все же продолжают заметно возрастать.

Фактическое отсутствие магнитного насыщения гранулированных магнетиков (в отличие от сплошных магнетиков) при увеличении H вплоть до 40–50 кА/м можно проследить на примере предельной полевой зависимости намагниченности M (см. рис. 4, кривые 1, 2), т. е. полевой зависимости M именно квазисплошного материала образцов. В противном случае, начиная с определённого, сравнительно небольшого значения H , на этой зависимости была бы выражена область автомодельности, как это обычно наблюдается для материала сплошных, в частности стальных, образцов. Более того, судя по рассмотренным в [21] аналогичным данным, полученным при намного более высоких значениях напряжённости поля (до $H = 163$ кА/м), магнитное насыщение такого рода магнетиков вряд ли возможно в принципе (или, вероятно, достижимо только при гиперзначениях $H \gg 163$ кА/м).

Закключение. Проанализированы экспериментально полученные в магнитном поле напряжённостью до 47 кА/м полевые зависимости индукции, магнитной проницаемости, восприимчивости и намагниченности цилиндрических гранулированных ферромагнитных образцов (естественная упаковка шаров диаметром 8 мм) при значениях отношения длины образца к его диаметру от 1 до 16. Установлено принципиальное отличие характера намагничивания гранулированных магнетиков от характера намагничивания сплошных магнетиков – отсутствие не только магнитного насыщения, но и признаков приближения к такому насыщению. Полученные результаты будут полезны при создании рабочих органов и функциональных элементов различных аппаратов и приборов с точки зрения обоснования выбора

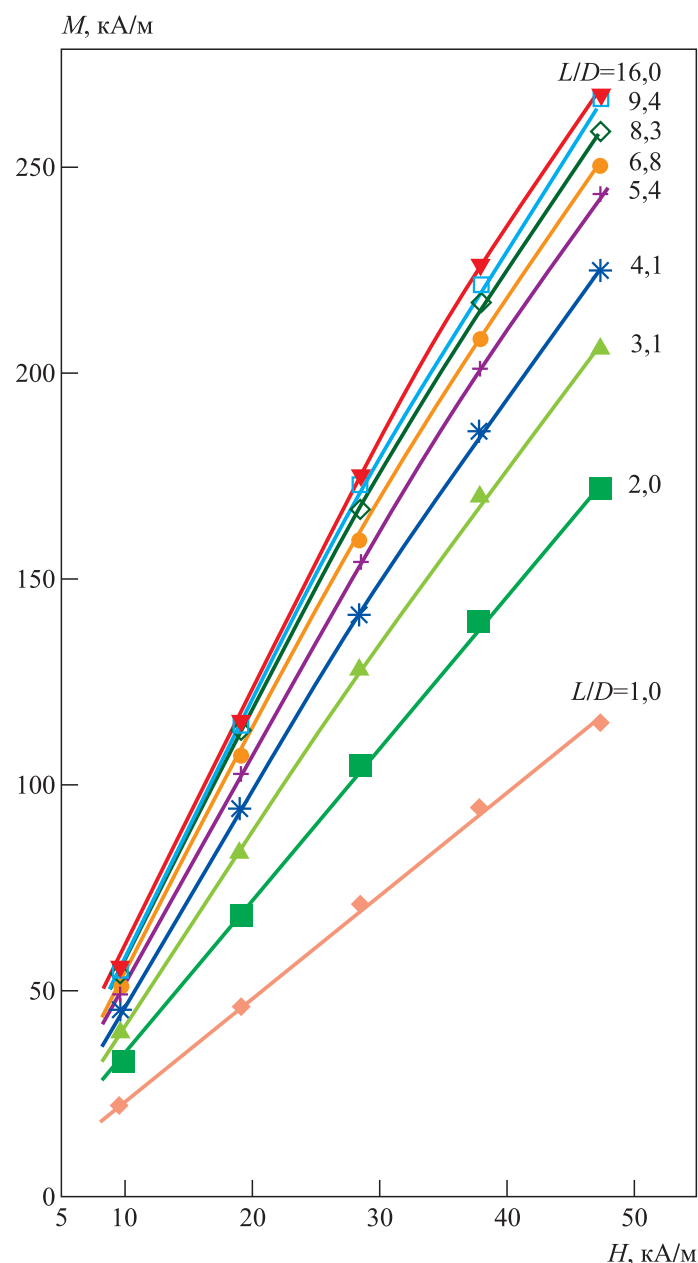


Рис. 4. Намагниченность цилиндрических полишаровых образцов, рассчитанная по формуле (4) с учётом приведённых на рис. 3 данных о магнитной восприимчивости

Fig. 4. Intensity of magnetization of a cylindrical specimens of balls taking into account formula (4) and data on Fig. 3

и анализа работоспособности ферро- и ферритмагнитных гранулированных материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания в сфере науки (проект № 0706-2020-0024), РФФИ и Лондонского Королевского Общества в рамках научного проекта № 20-52-10006; гранта Президента РФ для господдержки молодых ученых (проект МК-807.2020.8).

Список литературы

1. Bjork R., Zhou Z., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 476, pp. 417–422. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.01.005
2. Diguët G., Beaugnon E., Cavaillé J. Y., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, vol. 322, pp. 3337–3341. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.06.020
3. Ильин Н. А., Климов А. А., Tiercelin N., Pernod P., Мишина Е. Д., Гапонов М. С., Брехов К. А., Сигов А. С., Преображенский В. Л. Динамика намагниченности в многослойных структурах TbCo/FeCo под действием фемтосекундного оптического возбуждения // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 50–58. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-50-58
4. Eskandarpour A., Iwai K., Asai S., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2008, vol. 19 (2), no. 4799183, pp. 84–95. DOI: 10.1109/TASC.2009.2014567
5. Mishima F., Terada T., Akiyama Y., Izumi Y., Okazaki H., Nishijima S., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2008, vol. 18 (2), no. 4520245, pp. 824–827. DOI: 10.1109/TASC.2008.920830
6. Сандуляк А. А., Ершова В. А., Сандуляк А. В. Металло- и энергоемкость модельного ряда магнитных соленоидных фильтров // Тяжелое машиностроение. 2007. № 4. С. 17–22.
7. Сандуляк А. А., Свистунов Д. И., Полисмакова М. Н., Сандуляк А. В., Ершова В. А., Ершов Д. В., Сандуляк Д. А. «Экстраполируемая цепочка» магнитных тест-фильтров как средство контроля ферропримесей // Законодательная и прикладная метрология. 2010. № 3. С. 35–40.
8. Mattei J. L., Minot O., Le Floc'h M., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1995, vol. 140–144 (3), pp. 2189–2190. DOI: 10.1016/0304-8853(94)00624-5
9. Sandulyak A. A., Sandulyak A. V., Ershova V. A., Pamme N., Ngmason B., Iles A., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 441, pp. 724–734. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.027
10. Sandulyak A. A., Ershova V. A., Sandulyak D. A., Sandulyak A. V., Polismakova M. N., *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 2, pp. 329–335. DOI 10.1007/s10891-017-1571-4
11. Сандуляк Д. А., Сандуляк А. А., Киселев Д. О., Сандуляк А. В., Полисмакова М. Н., Кононов М. А., Ершова В. А. Определение магнитной восприимчивости феррочастиц по данным восприимчивости их дисперсных образцов // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 48–52. DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-9-48-52
12. Anhalt M., *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, vol. 320, pp. e366–e369. DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.02.072
13. Яшин М. М., Мирзокулов Х. Б. Симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта как эффективный метод исследования нанокмпозитов // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 92–100. DOI/10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100
14. Chen D. X., Pardo E., Zhu Y.-H., Xiang L.-X., Ding J.-Q., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 449, pp. 447–454. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.10.069
15. Yaglidere I., Gunes E. O., *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 400–411. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2765624

16. Im S. H., Park G. S., *Proceeding of the 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 7–10 October 2018, Jeju, South Korea, 2018, pp. 2629–2632. DOI: 10.23919/ICEMS.2018.8548969
17. Wang M., Feng J., Shi Y., Shen M., *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 66, no. 3, pp. 1842–1851. DOI: 10.1109/TIE.2018.2840485
18. Caciagli A., Baars R. J., Philipse A. P., Kuipers B. W. M., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 456, pp. 423–432. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.02.003
19. Marinica O. M., *Journal of Nanomaterials*, 2017, 9 p. DOI: 10.1155/2017/5407679
20. Périgo E. A., Weidenfeller B., Kollár P., Füzér J., *Applied Physics Review*, 2018, vol. 5, p. 031301. DOI: 10.1063/1.5027045
21. Сандуляк А. В., Сандуляк Д. А., Ершова В. А., Ткаченко Р. Ю., Сандуляк А. А., Полисмакова М. Н. Магнитные характеристики «короткого» пористого магнетика: на примере засыпки шаров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 3 (335). С. 121–133.

References

1. Bjork R., Zhou Z., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 476, pp. 417–422. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.01.005
2. Diguët G., Beaugnon E., Cavaillé J. Y., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, vol. 322, pp. 3337–3341. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.06.020
3. Ilyin N. A., Klimov A. A., Tiercelin N., Pernod P., Mishina E. D., Gaponov M. S., Brekhov K. A., Sigov A. S., Preobrazhensky V. L., *Russian Technological Journal*, 2019, vol. 7, no. 3, pp. 50–58. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-50-58
4. Eskandarpour A., Iwai K., Asai S., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2008, vol. 19 (2), no. 4799183, pp. 84–95. DOI: 10.1109/TASC.2009.2014567
5. Mishima F., Terada T., Akiyama Y., Izumi Y., Okazaki H., Nishijima S., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2008, vol. 18 (2), no. 4520245, pp. 824–827. DOI: 10.1109/TASC.2008.920830
6. Sandulyak A. A., Ershova V. A., Sandulyak A. V., *Tyazheloje mashinostroyeniye*, 2007, no. 4, pp. 17–22 (in Russian).
7. Sandulyak A. A., Svistunov D. I., Polismakova M. N., Sandulyak A. V., Ershova V. A., Ershov D. V., Sandulyak D. A., *Zakonodatelnaja i prikladnaya metrologiya*, 2010, no. 3, pp. 35–40 (in Russian).
8. Mattei J. L., Minot O., Le Floc'h M., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1995, vol. 140–144 (3), pp. 2189–2190. DOI: 10.1016/0304-8853(94)00624-5
9. Sandulyak A. A., Sandulyak A. V., Ershova V. A., Pamme N., Ngmason B., Iles A., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 441, pp. 724–734. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.027
10. Sandulyak A. A., Ershova V. A., Sandulyak D. A., Sandulyak A. V., Polismakova M. N., *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 2, pp. 329–335. DOI 10.1007/s10891-017-1571-4

11. Sandulyak D. A., Sandulyak A. A., Kiselev D. O., Sandulyak A. V., Polismakova M. N., Kononov M. A., Ershova V. A., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 928–933. DOI: 10.1007/s11018-017-1295-z
12. Anhalt M., *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, vol. 320, pp. e366–e369. DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.02.072
13. Yashin M. M., Mirzokulov H. B., *Russian Technological Journal*, 2019, vol. 7, no. 4, pp. 92–100. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100
14. Chen D. X., Pardo E., Zhu Y.-H., Xiang L.-X., Ding J.-Q., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 449, pp. 447–454. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.10.069
15. Yaglidere I., Gunes E. O., *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 400–411. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2765624
16. Im S. H., Park G. S., *Proceeding of the 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 7–10 October 2018, Jeju, South Korea, 2018, pp. 2629–2632. DOI: 10.23919/ICEMS.2018.8548969
17. Wang M., Feng J., Shi Y., Shen M., *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 66, no. 3, pp. 1842–1851. DOI: 10.1109/TIE.2018.2840485
18. Caciagli A., Baars R. J., Philipse A. P., Kuipers B. W. M., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 456, pp. 423–432. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.02.003
19. Marinica O. M., *Journal of Nanomaterials*, 2017, 9 p. DOI: 10.1155/2017/5407679
20. Périgo E. A., Weidenfeller B., Kollár P., Füzér J., *Applied Physics Review*, 2018, vol. 5, p. 031301. DOI: 10.1063/1.5027045
21. Sandulyak A. V., Sandulyak D. A., Ershova V. A., Tkachenko R. Y., Sandulyak A. A., Polismakova M. N., *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2019, vol. 3 (335), pp. 121–133.

Дата поступления: 19.12.2019.

Дата принятия: 26.02.2020.

Analysis of dependence between magnetic properties of granulated ferromagnetic specimens and relation of its length to diameter

Alexander V. Sandulyak¹, Roman Y. Tkachenko¹, Darya A. Sandulyak¹, Maria N. Polismakova¹, Anna A. Sandulyak¹, Vera A. Ershova²

¹MIREA – Russian technological university, Moscow, Russian Federation, e-mail: a.sandulyak@mail.ru, separator-mami@mail.ru, d.sandulyak@mail.ru, m.polismakova@mail.ru

²Moscow polytechnical university, Moscow, Russian Federation, e-mail: a.separator@mail.ru, v.ershova@mail.ru

Paper studies the problems about experimental determining magnetic parameters of nonuniform granular magnetics. It has been noted that the existing shortage of direct and (or) indirect experimental data on the magnetic properties of granular ferromagnetic specimens with different values of a relative length, in particular, has a negative impact on the validity of the requirements and decisions to create and ensure the performance of relevant functional elements, movable operating elements of various equipments and devices. By the example of cylindrical specimens of balls with the range of relative length 1–16 within the framework of effective medium macromodel the dependences of induction, magnetic permeability, susceptibility, magnetization and field intensity have been obtained. It has been shown that in the range of field intensity 9–47 kA/m values of induction and magnetization of investigating specimens increase, that indicates the absence of magnetic saturation of such granular (as opposed to solid) magnetics. And this is the case at almost stable values of magnetic susceptibility and permeability. Obtained results are useful in designing movable operating elements of various equipments and devices.

Key words: specimen of balls with cylindrical form, relative length, field dependencies of magnetic induction, permeability, susceptibility, intensity of magnetization.